



(12) Ausschließungspatent

(11) DD 298 849 A5

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1

Patentgesetz der DDR

vom 27. 10. 1983

in Übereinstimmung mit den entsprechenden
Festlegungen im Einigungsvertrag

5(51) G 02 B 1/10

DEUTSCHES PATENTAMT

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) DD G 02 B / 337 506 2

(22) 02.02.90

(44) 12.03.92

(71) siehe (73)

(72) Hacker, Erik, Dr. rer. nat.; Kaiser, Hans, Prof.; Kaiser, Hans-Christoph, Dr.; Lauth, Hans, Dipl.-Phys.; Löttsch, Sabine, Dipl.-Math., DE

(73) Jenoptik Carl Zeiss JENA GmbH, Carl-Zeiss-Straße 1, O - 6900 Jena, DE

(54) Breitband-Entspiegelungsschichtbelag

(55) Brechzahl; breitbandige; Dicke; Entspiegelung; Glassubstrat; infraroten; Lichtwellenlänge; Reflexion; Schichtzahl; Spektralbereich

(57) Die Erfindung betrifft einen Vielschicht-Entspiegelungsbelag insbesondere zur Minderung der Reflexion von Licht an Glas-Grenzflächen im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich. Die Erfindung ist in allen Bereichen der Technik anwendbar, wo es um die breitbandige Entspiegelung optischer Elemente geht, die im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich transparent sind. Der Breitband-Entspiegelungsschichtbelag besteht aus fünf Einzelschichten, die eine konstante optische Dicke aufweisen. Die optischen Dicken der Einzelschichten sind gleich einem Viertel einer Lichtwellenlänge im Spektralbereich von 620 Nanometer bis 660 Nanometer, wobei die Brechzahlen der Einzelschichten in der folgenden Reihung in den angegebenen Bereichen liegen:

Schichtzahl	Substanz	Brechzahl n bei 550 Nanometer
Glassubstrat		$n \geq 1,45$
1	M	$1,55 \leq n \leq 1,75$
2	H	$1,80 \leq n \leq 2,10$
3	H	$2,00 \leq n \leq 2,30$
4	H	$1,75 \leq n \leq 2,00$
5	N	$n \leq 1,50$
Luft		$n = 1,0003$

Patentansprüche:

1. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag zur Minderung der Reflexion von niedrigbrechenden Substraten im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich, bestehend aus fünf Einzelschichten, die eine konstante optische Dicke aufweisen und aus mindestens einer hochbrechenden schichtbildenden Substanz H und aus mindestens einer mittelbrechenden schichtbildenden Substanz M und aus mindestens einer niedrigbrechenden schichtbildenden Substanz N bestehen, gekennzeichnet dadurch, daß die optischen Dicken der Einzelschichten gleich einem Viertel einer Lichtwellenlänge im Spektralbereich von 620 Nanometer bis 660 Nanometer sind, wobei die Brechzahlen der Einzelschichten in der folgenden Reihung in den angegebenen Bereichen liegen:

Schichtzahl	Substanz	Brechzahl n bei 550 Nanometer
Glassubstrat		$n \geq 1,45$
1	M	$1,55 \leq n \leq 1,75$
2	H	$1,80 \leq n \leq 2,10$
3	H	$2,00 \leq n \leq 2,30$
4	H	$1,75 \leq n \leq 2,00$
5	N	$n \leq 1,50$
Luft		$n = 1,0003$

2. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die hochbrechende schichtbildende Substanz H mindestens teilweise aus CeO_2 oder ZrO_2 oder TiO_2 oder HfO_2 oder Nd_2O_3 oder Ta_2O_5 oder Nb_2O_5 oder Y_2O_3 oder In_2O_3 oder La_2O_3 oder Sb_2O_5 oder Sc_2O_3 oder ThO_2 oder Gd_2O_3 oder BaO oder ZnS oder PbF_2 besteht.
3. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die mittelbrechende schichtbildende Substanz M mindestens teilweise aus Al_2O_3 oder GeO_2 oder MgO oder SiO_x oder $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_4$ oder MgAl_2O_4 oder Mg_2SiO_4 oder CaSiO_3 oder BaSiO_3 oder LaF_3 oder NdF_3 oder CeF_3 besteht.
4. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die niedrigbrechende Substanz L mindestens teilweise aus SiO_2 oder MgF_2 oder ThF_4 oder LaF_3 oder CeF_3 oder NaF oder LiF oder CaF_2 oder AlF_3 oder $\text{Na}_3(\text{AlF}_4)$ besteht.
5. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die Einzelschichten des Schichtsystems folgende Brechzahlen und optische Schichtdicken aufweisen:

Schicht-Nr.	optische Dicke $n \times d$ (Nanometer)	Brechzahl n
Substrat BK-7		1,52
1	160	1,68
2	160	2,05
3	160	2,30
4	160	1,94
5	160	1,38
Superstrat	Luft	1,0003

6. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag nach Anspruch 5, gekennzeichnet dadurch, daß die erste, unmittelbar am Substrat anliegende Schicht aus Al_2O_3 oder MgO besteht und die zweite Schicht aus ZrO_2 oder Nd_2O_3 besteht und die dritte Schicht aus TiO_2 oder ZnS besteht und die vierte Schicht aus La_2O_3 oder Y_2O_3 besteht und die fünfte, unmittelbar an das Superstrat grenzende Schicht aus MgF_2 oder SiO_2 besteht.
7. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die Einzelschichten des Schichtsystems folgende Brechzahlen und optische Schichtdicken aufweisen:

Schicht-Nr.	Optische Dicke $n \times d$ [Nanometer]	Brechzahl n
Substrat BK-7		1,52
1	160	1,60
2	160	1,83
3	160	2,00
4	160	1,80
5	160	1,38
Superstrat	Luft	1,0003

8. Breitband-Entspiegelungsschichtbelag nach Anspruch 7, gekennzeichnet dadurch, daß die erste, unmittelbar am Substrat anliegende Schicht aus Al_2O_3 oder NdF_3 besteht und die zweite Schicht aus Y_2O_3 oder Sc_2O_3 besteht und die dritte Schicht aus ZrO_2 oder HfO_2 besteht und die vierte Schicht aus Gd_2O_3 oder PbF_2 besteht und die fünfte, unmittelbar an das Superstrat grenzende Schicht aus MgF_2 oder SiO_2 besteht.

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft einen Vielschicht-Entspiegelungsbelag insbesondere zur Minderung der Reflexion von Licht an Glas-Grenzflächen im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich. Die Erfindung ist in allen Bereichen der Technik anwendbar, wo es um die breitbandige Entspiegelung optischer Elemente geht, die im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich transparent sind. Die Erfindung ist speziell zu Entspiegelung von optischen Elementen aus Gläsern, Plasten oder Kristallen für transmittierende Anwendungen in optischen Anordnungen und Geräten geeignet, deren Funktion auf der Verwendung verschiedener optischer Kanäle beruht.

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

In der Optik werden traditionell Beschichtungen aus ein oder zwei Einzelschichten zur Entspiegelung optischer Elemente aus Gläsern, Plasten, Kristallen u. dgl. insbesondere dann technisch genutzt, wenn sich der spektrale Anwendungsbereich auf eine Lichtwellenlänge oder auf ein sehr schmales Spektralband beschränkt. Ursache dafür ist die Entspiegelungsbedingung, die bei einer optischen Dicke $n_i d_i$ der Einzelschichten von einem Viertel der Lichtwellenlänge λ_0 definierte Beziehungen zwischen den Schichtbrechzahlen n_i und den Substrat- n_s bzw. Superstratbrechzahlen n_a erfordern ($n_1^2 = n_s n_a$ für eine Einzelschicht, $n_2^2 n_s$ bzw. $n_1 n_2 = n_s n_a$ für eine Zweifachschicht mit Zählung der n_i beginnend beim Substrat), die aufgrund der geringen Zahl der frei wählbaren Parameter lediglich bei einer (V-Spiegelung) oder zwei (W-Entspiegelung) Wellenlängen zur Null-Reflexion führen können. Beispielsweise ist bei Anwendung eines Zweifachschichtsystems mit gleichen optischen Dicken der Einzelschichten und entsprechenden Brechzahlen möglich, nahezu perfekte Entspiegelungen bei einer Wellenlänge zu lasten einer reduzierten Bandbreite zu erreichen. Im allgemeinen ist jedoch aufgrund der verfügbaren Brechzahlen schichtbildender Materialien die Sicherung der geforderten Beziehung zwischen Substrat- und Schichtbrechzahlen besonders bei Gläsern mit Brechzahlen im Bereich von 1,45... 1,9 problematisch.

Für die häufig erforderliche breitbandige Entspiegelung optischer Elemente über den gesamten sichtbaren Spektralbereich von 400... 700 nm sind eine Vielzahl von Lösungen bekannt, die auf Vielschicht-Antireflexbelägen beruhen. Da keine allgemeingültigen, systematischen Methoden zur Ermittlung der Designs von Vielschicht-Entspiegelungsbelägen existieren, sind gegenwärtig intuitive trial-and-error-Methoden die vorherrschenden Verfahren zur Bestimmung der Startsysteme für Designs, die dann durch bekannte Näherungs- und Optimierungstechniken (graphische Methoden, Rechneroptimierung) häufig unter Berücksichtigung des dispersiven Verhaltens und der optischen Verluste der eingesetzten Medien weiter verbessert werden.

Ein Spezialfall der Ermittlung der Designs von Vielschicht-Entspiegelungsbelägen beruht auf der klassischen Lösung von JUPNIK (z. B. in „Physics of Thin Films“, Vol. 2, p. 272, editors: G. Hass und R. E. Thun, Academic Press) auf der Basis von Viertelwellenlängen-Systemen, die zu definierten Proportionalitätsbeziehungen zwischen den Schichtbrechzahlen und den angrenzenden Medien führen:

$$\frac{n_k}{n_a} = \dots = \frac{n_{i+1}}{n_{i+2}} = \frac{n_i}{n_{i+1}} = \frac{n_{i-1}}{n_i} = \dots = \frac{n_s}{n_1}$$

mit $i = 1 \dots k$ und

$$n_a < n_k < \dots < n_{i+2} < n_{i+1} < n_i < n_{i-1} < \dots < n_1 < n_s$$

Speziell zur Lösung der Problematik einer für die Massenproduktion geeigneten breitbandigen Entspiegelung von niedrigbrechenden optischen Elementen wurden z. B. in den Schriften U.S. Pat. No. 3185020 und U.S. Pat. No. 3604783 3-Schicht-Entspiegelungsbeläge vorgeschlagen, die auf dem klassischen $\lambda/4 - \lambda/2 - \lambda/4$ -Design (W. F. Geffken, D-RP 758 767) beruhen. Durch Einfügen einer hochbrechenden Halbwellenschicht zwischen die beiden Viertelwellenschichten kann die für eine Zweifachschicht charakteristische geringe Restreflexion über eine größere Bandbreite erreicht werden. Derartige Beläge

besitzen bei Erfüllung der Brechzahlbedingung $n_2^2 = n_1 n_3 = n_0 n_s$ für drei Wellenlängen Nullstellen der Reflexion. Diese Nullstellen liegen symmetrisch zur Schwerpunktwellenlänge λ_0 , wenn $n_1^2 = n_0 n_2$ und $n_3^2 = n_2 n_s$ sind. Diese 3-Schicht-Entspiegelungssysteme wie auch die bzgl. n_1 und n_3 optimierten 3-Schichtsysteme, die dann keine Viertelwellenlängendesigns mehr sind, (siehe z.B. H. A. Macleod „Thin Film Optical Filters“, 2nd ed., Adam Hilger Ltd., Bristol, 1986) gewährleisten im Vergleich zu 1- und 2-Schicht-Systemen eine effektive Minderung der Reflexion über einen wesentlich breiteren Spektralbereich. Wie die oben angegebenen Gleichungen jedoch zeigen, sind die Beziehungen zwischen der Substratbrechzahl und den Brechzahlen der 1. und 3. Schicht (n_1, n_3) kritisch und aufgrund der in der Natur nur beschränkt verfügbaren Schichtbrechzahlen für die technisch wichtigen Substratbrechzahlen $n_s = 1,45 \dots 1,9$ nicht immer realisierbar.

Zur Verbesserung der Design-Flexibilität von Entspiegelungsbelägen sind z.B. in den Schriften U.S. Pat. No. 3432225 und U.S. Pat. No. 3565509 Lösungen angegeben, bei denen in herkömmlichen 3- oder 4-Schicht-Systemen die $\lambda/2$ -Schichten aus hochbrechenden Substanzen und/oder die $\lambda/4$ -Schichten aus mittelbrechenden Substanzen durch 2 bis 3 dünnere, brechzahl-differente Schichten mit einer summarisch äquivalenten optischen Dicke ersetzt werden. Dadurch ist es möglich, die Anpassungsmöglichkeiten an verschiedenen Substratbrechzahlen zu verbessern, ohne jedoch die Bandbreite der Entspiegelungswirkung wesentlich zu beeinflussen. Ein für die kommerzielle Massenproduktion besonderer Nachteil dieser Lösungen besteht in der Verwendung extrem dünner Schichten zur Approximation der $\lambda/4$ - bzw. $\lambda/2$ -Schichten, die im allgemeinen Toleranzprobleme verursachen, die insbesondere auf Schwierigkeiten bei der Monitorierung extrem dünner Schichten mit Inhomogenitäten und Instabilitäten der Brechzahlen sowie optische Verluste zurückzuführen sind. Die Verwendung von 4-Schicht-Entspiegelungsbelägen ergibt im allgemeinen eine gegenüber 3-Schicht-Designs verbesserte Bandbreite. Beispiel dafür ist eine nach JUPNIK ermittelte Design-Struktur mit der Schichtfolge:

Glas- $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $\lambda/4$ - $\lambda/4$ -Luft

in der die Brechzahlen der Gleichung:

$$n_1 n_4 = n_2 (n_s n_3)^{1/2}$$

genügen müssen. Zur technischen Realisierung eines solchen Belages sind vier verschiedene schichtbildende Materialien mit entsprechenden Gebrauchswerteigenschaften erforderlich, die häufig nur näherungsweise die theoretischen Bedingungen erfüllen und in der Regel durch spezifische Probleme im Beschichtungsprozeß (Monitorierung, Instabilität und Inhomogenität der Brechzahlen, Kompatibilität, optische Verluste, Fraktionierung, Dissoziation usw.) die kommerzielle Massenproduktion beeinträchtigen. Ein Beispiel für einen 4-Schicht-Entspiegelungsbelag mit vier Schichtsubstanzen ist in der Schrift U.S. Pat. No. 3463574 angegeben.

Zur Beseitigung dieser Nachteile wurde in der Schrift U.S. Pat. No. 3781090 speziell für ein 4-Schicht-System ein alternatives Design-Modell vorgeschlagen, das eine hohe Flexibilität bei der Variation der optischen bzw. geometrischen Dicken der Einzelschichten zur Kompensation von material- oder schichtstrukturbedingten Brechzahlabweichungen gestattet, ohne jedoch die Zahl der erforderlichen Schichtsubstanzen zu reduzieren. Ein dickenoptimierter 4-Schichtbelag, der mit nur zwei Substanzen auskommt, ist beispielsweise von C. J. VAN DER LAAN und H. I. FRANKENA in Proceedings auf SPIE, Vol. 401, „Thin Film Technologies“ (1983) p. 117 beschrieben. Die Bandbreite der Entspiegelungswirkung dieses Belages bleibt jedoch auf den visuellen Spektralbereich beschränkt.

Für Vielschicht-Entspiegelungsbeläge, die zu ihrer Realisierung nur zwei schichtbildende Substanzen benötigen, wurden Lösungen angegeben, die zur Approximation nicht verfügbarer Brechzahlen entweder auf der Äquivalentschicht-Theorie oder auf der Synthese theoretisch erforderlicher Brechzahlen durch Bildung von Mischschichten beruhen.

Beispielsweise ist in der Schrift U.S. Pat. No. 3565509 eine Lösung angegeben, in der symmetrische Anordnungen einer hoch- und einer niedrigbrechenden Substanz im Sinne einer Äquivalentschicht theoretische Lösungen für Einzelschichten in herkömmlichen Schicht-Strukturen substituieren, wobei jedoch die Äquivalenzbedingung (äquivalente Brechzahlen und Schichtdicken) nur für eine Wellenlänge erfüllt ist. In derartigen Schicht-Strukturen ist es zur Realisierung optimaler Entspiegelungs-Bandbreiten erforderlich, daß die optische Dicke der vom Substrat aus gezählten 3. Schicht kleiner sein muß als die Summe aus der Dicke der unmittelbar am Substrat anliegenden Schicht und $\lambda_0/2$.

Ein Beispiel für die Synthese von Brechzahlen durch Mischschichtbildung für Entspiegelungsbeläge ist in der Schrift U.S. Pat. No. 3176574 angegeben, in der vorgeschlagen wird, die gewünschten Brechzahlen oder Brechzahlprofile durch Co-Verdampfen von zwei brechzahl-differenten Materialien zu realisieren, wobei die Brechzahlen über die entsprechenden Volumenanteile beider Substanzen in der Schicht entsprechend bekannter Mischungsformeln (z.B. R. Jacobsson in „Physics of Thin Films“, Vol. 8, p. 16, editors: G. Hass, M. H. Francombe and R. W. Hoffman, Academic Press, 1975) eingestellt werden können. Diese Methode erfordert jedoch technisch aufwendige Mittel zur präzisen Steuerung der Verdampfung aus zwei Substanzquellen oder ein Verdampfen von Substanzmischungen ohne Fraktionierungseffekte.

Für 5-Schicht-Entspiegelungsbeläge, die auf klassischen $\lambda_0/4$ -Designs beruhen, gelten bezüglich ihrer Anwendbarkeit und Flexibilität die bereits bei Entspiegelungsbelägen mit geringeren Schichtzahlen genannten Restriktionen hinsichtlich der Brechzahlproportionalität. Diese Probleme sind besonders akut, wenn die Lösungen eine hohe Sensibilität und Instabilität in bezug auf Brechzahlabweichungen aufweisen. Diese Sensibilität kann durch Variation der optischen Dicken auch bei 5-Schicht-Belägen in gewissen Grenzen ausgeglichen werden (U.S. Pat. No. 3858965, U.S. Pat. No. 3922068).

Prinzipielle fertigungstechnische Probleme bestehen auch dann, wenn Vielschicht-Entspiegelungssysteme aus 6...7 Einzelschichten aufgebaut werden, die auf einem aus zwei Substanzen bestehenden Pseudo-Äquivalentschichtdicken-Design beruhen, wie beispielsweise in den Schriften U.S. Pat. No. 3799653 und U.S. Pat. No. 3960441 vorgeschlagen wurde. Alle bisher genannten Lösungen besitzen den grundsätzlichen Nachteil, daß ihre Entspiegelungswirkung auf den visuellen Spektralbereich mit Lichtwellenlängen von 400...700nm beschränkt ist. Dies trifft auch auf Lösungen zu, bei denen zur Erhöhung der Designflexibilität Mehrfachhalbwellen-Schichten Anwendung finden (G. W. DeBell, Proceedings of SPIE, Vol. 401, „Thin Film Technologies“, p. 127). Für viele optische Geräte Lösungen ist jedoch eine Erweiterung der Entspiegelungswirkung in den nahen infraroten Spektralbereich erforderlich.

Speziell für optische Geräte mit aktiven Autofokussiereinrichtungen auf der Basis von Infrarotstrahlung (Fotoapparate) wurde in der Schrift U.S. Pat. N. 4726654 ein 6- bzw. 7-Schicht-Entspiegelungssystem vorgeschlagen, dessen Realisierung mindestens drei Substanzen erfordert, von denen die hochbrechende Substanz eine Mischsubstanz ist. Auf der Grundlage dieses Design konnte mit speziellen Ausführungsformen, die nach der in der Schrift U.S. Pat. No. 4387960 angegebenen Methode optimiert wurden, eine breitbandige Entspiegelung von Glas realisiert werden, die im Spektralbereich von 400 bis 700 nm eine Restreflexion $< 0,6\%$ und im Bereich von 400 bis 800 nm eine Restreflexion $< 1\%$ gewährleistet. Diese Verschiebung der langwelligeren Kante des Entspiegelungsbereiches um ca. 100 nm genügt den Forderungen von aktiven IR-Autofokussiersystemen auf der Basis von herkömmlichen IR-Halbleiter-Bauelementen.

Im optischen Gerätebau besteht die Forderung nach Breitbandentspiegelungen, die über den gesamten visuellen und nahen infraroten Spektralbereich bis einschließlich der Laserwellenlänge $1,06\mu\text{m}$ eine effektive Minderung der Reflexion von optischen Elementen gewährleisten. Anwendungsbeispiele sind dabei optische Geräte und Anordnungen z. B. im Vermessungswesen, der Medizintechnik, der Militärtechnik usw., bei denen aus technischen und/oder ökonomischen Gründen verschiedene optische Kanäle durch die gleichen optischen Elemente geführt werden. Typische Beispiele derartiger Kombinationen sind die visuelle und Nachtsicht-Beobachtung, Techniken der aktiven IR-Autofokussierung oder IR-Informationsübertragung sowie Meß- und Bearbeitungsaufgaben mittels $1,06\mu\text{m}$ -Laserlicht.

Technische Lösungen zur Realisierung einer effektiven Minderung der Reflexion optischer Elemente über den gesamten visuellen und nahen infraroten Spektralbereich einschließlich der Laserwellenlänge $1,06\mu\text{m}$ sind in der Literatur nicht angegeben.

Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist die effektive Minderung der Reflexion insbesondere von niedrigbrechenden optischen Elementen im visuellen bis infraroten Spektralbereich unter Einbeziehung der Laserwellenlänge $1,06\mu\text{m}$. Diese breitbandige Entspiegelung soll mit herkömmlichen Materialien und geringem technischen und technologischen Aufwand realisierbar sein.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Lösungsmöglichkeiten für den Aufbau eines dielektrischen Breitband-Entspiegelungsschichtbelages anzugeben, der bei Anwendung auf niedrigbrechenden optischen Elementen im gesamten Spektralbereich von ca. 450...1100 nm eine Restreflexion $< 0,9\%$ gewährleistet und konstante optische Schichtdicken bezüglich einer Schwerpunktwellenlänge λ_0 aufweist.

Die Aufgabe wird bei einem Breitband-Entspiegelungsschichtbelag zur Minderung der Reflexion von niedrigbrechenden Substraten im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich, bestehend aus fünf Einzelschichten, die eine konstante optische Dicke aufweisen und aus mindestens einer hochbrechenden schichtbildenden Substanz H und aus mindestens einer mittelbrechenden schichtbildenden Substanz M und aus mindestens einer niedrigbrechenden schichtbildenden Substanz N bestehen, dadurch gelöst, daß die optischen Dicken der Einzelschichten gleich einem Viertel einer Lichtwellenlänge im Spektralbereich von 620 Nanometer bis 660 Nanometer sind, wobei die Brechzahlen der Einzelschichten in der folgenden Reihung in den angegebenen Bereichen liegen:

Schichtzahl	Substanz	Brechzahl n bei 550
Nanometer		
Glassubstrat		$n \geq 1,45$
1	M	$1,55 \leq n \leq 1,75$
2	H	$1,80 \leq n \leq 2,10$
3	H	$2,00 \leq n \leq 2,30$
4	H	$1,75 \leq n \leq 2,00$
5	N	$n \leq 1,50$
Luft		$n = 1,0003$

Mit diesem Design für ein Breitband-Entspiegelungsschichtsystem ist es unter Verwendung von konstanten optischen Schichtdicken der Einzelschichten und Brechzahlen aus dem Spektrum von herkömmlichen schichtbildenden Substanzen möglich, niedrigbrechende Substrate unter Berücksichtigung der Dispersion im Spektralbereich von ca. 450 nm bis ca. 1100 nm mit einer Restreflexion $\leq 0,9\%$ wirkungsvoll zu entspiegeln. Der Einsatz von technologisch erprobten schichtbildenden Substanzen und das Verwenden von sehr dünnen Schichten bieten den Vorteil einer Massenfertigung mittels konventioneller Aufdampf- und Monitorierungstechnik. Bei entsprechender Wahl der Substanzkombinationen und Herstellungsparameter können gute schichtoptische Gebrauchswerteigenschaften des Breitband-Entspiegelungsschichtbelages erzielt werden. Zweckmäßigerweise besteht die hochbrechende schichtbildende Substanz H in vorteilhaften Ausführungsformen der Erfindung mindestens teilweise aus CeO_2 oder ZrO_2 oder TiO_2 oder Nd_2O_3 oder Ta_2O_5 oder Nb_2O_5 oder HfO_2 oder Y_2O_3 oder In_2O_3 oder La_2O_3 oder Sb_2O_5 oder Sc_2O_3 oder ThO_2 oder Gd_2O_3 oder BaO oder ZnS oder PbF_2 . Es ist günstig, wenn die mittelbrechende schichtbildende Substanz M mindestens teilweise aus Al_2O_3 oder GeO_2 oder MgO oder SiO_x oder $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_4$ oder MgAl_2O_4 oder Mg_2SiO_4 oder CaSiO_3 oder BaSiO_3 oder LaF_3 oder NdF_3 oder CeF_3 besteht. Die niedrigbrechende Substanz N besteht vorteilhaft mindestens teilweise aus SiO_2 oder MgF_2 oder ThF_4 oder LaF_3 oder CeF_3 oder NaF oder LiF oder CaF_2 oder AlF_3 oder $\text{Na}_3(\text{AlF}_4)$. Der Einsatz dieser Substanzen sichert bei einer guten Kompatibilität, niedrigen optischen Verlusten und guten Resistenzeigenschaften die für die spektralen Eigenschaften des erfindungsgemäßen Breitband-Entspiegelungsschichtbelages

erforderlichen Brechzahlen. Obwohl der Einsatz von Substanzmischungen denkbar und in speziellen Anwendungsfällen von Vorteil ist, kann der erfindungsgemäße Breitband-Entspiegelungsschichtbelag auf einfache Art und Weise durch sequentielles Verdampfen ausgewählter Kombination der angegebenen schichtbildenden Substanzen erzeugt werden. Eine erste, besonders vorteilhafte Ausführungsform ist in folgender Tabelle in Form der den Einzelschichten zugeordneten optischen Schichtdicken und Brechzahlen angegeben:

Schicht-Nr.	Optische Dicke $n \times d$ (Nanometer)	Brechzahl n
Substrat BK-7		1,52
1	160	1,68
2	160	2,05
3	160	2,30
4	160	1,94
5	160	1,38
Superstrat	Luft	1,0003

Es ergeben sich günstige Realisierungsmöglichkeiten der Erfindung, wenn die erste, unmittelbar am Substrat anliegende Schicht aus Al_2O_3 oder MgO besteht und die zweite Schicht aus ZrO_2 oder Nd_2O_3 besteht und die dritte Schicht aus TiO_2 oder ZnS besteht und die vierte Schicht aus La_2O_3 oder Y_2O_3 besteht und die fünfte, unmittelbar an Luft grenzende Schicht aus MgF_2 oder SiO_2 besteht. Mit diesen Schichtenparametern lassen sich besonders streulichtarme Breitband-Entspiegelungsschichtbeläge herstellen.

Eine zweite, besonders günstige Ausführungsform ist in folgender Tabelle in Form der den Einzelschichten zugeordneten optischen Schichtdicken und Brechzahlen angegeben:

Schicht-Nr.	Optische Dicke $n \times d$ (Nanometer)	Brechzahl n
Substrat BK-7		1,52
1	160	1,60
2	160	1,83
3	160	2,00
4	160	1,80
5	160	1,38
Superstrat	Luft	1,0003

Für die Herstellung und Gewährleistung der Leistungseigenschaften ist es zweckmäßig, wenn die erste, unmittelbar am Substrat anliegende Schicht aus Al_2O_3 oder NdF_3 besteht und die zweite Schicht aus Y_2O_3 oder Sc_2O_3 besteht und die dritte Schicht aus ZrO_2 oder HfO_2 besteht und die vierte Schicht aus Gd_2O_3 oder PbF_2 besteht und die fünfte, unmittelbar an Luft grenzende Schicht aus MgF_2 oder SiO_2 besteht. Mit dieser Parametrierung und Substanzwahl können besonders laserfeste Breitband-Entspiegelungsschichtbeläge realisiert werden.

Alle angegebenen Substanzkombinationen besitzen eine ausgezeichnete Kompatibilität, lassen sich mit herkömmlichen Verdampfungsverfahren, aber auch durch andere Beschichtungstechniken in zufriedenstellender schichtoptischer Qualität mit hervorragenden Resistenzeigenschaften gegenüber mechanischen, chemischen, klimatischen o. ä. Einflüssen darstellen. Mit dem erfindungsgemäßen Schichtsystem für einen Breitband-Entspiegelungsschichtbelag ist es bei komplexer Gewährleistung guter Applikationseigenschaften und einfacher Herstellung möglich, insbesondere niedrigbrechende optische Elemente vom visuellen bis nahen infraroten Spektralbereich einschließlich der Laserwellenlänge $1,06 \mu\text{m}$ mit einer Restreflexion $\leq 0,9\%$ zu entspiegeln.

Mit dem erfindungsgemäßen Breitband-Entspiegelungsschichtbelag ausgerüstete optische Geräte und Anordnungen besitzen für optische Kanäle im Bereich vom visuellen bis zum nahen infraroten Spektralbereich bei geringen optischen Verlusten eine hohe Transmission und Laserfestigkeit.

Ausführungsbeispiele

Die Erfindung soll anhand von zwei Beispielen näher erläutert werden.

Als erstes Beispiel soll das dielektrische Schichtsystem für einen erfindungsgemäßen Breitband-Entspiegelungsschichtbelag angegeben werden, der im Spektralbereich von 450 nm bis 1100 nm eine Restreflexion $R \leq 0,60\%$ aufweist und geringe Streulichtverluste besitzt. Dazu wird ein Substrat aus BK-7, Kieselglas o. dgl. mit fünf Einzelschichten mit einer konstanten optischen Schichtdicke von 160 nm belegt, wobei die Brechzahlen der Einzelschichten die in Tabelle 1 angegebenen Werte annehmen müssen. Zur Realisierung dieser Parameter werden beginnend mit der ersten, unmittelbar am Substrat anliegenden Schicht folgende Substanzen in der Reihenfolge: Al_2O_3 — ZrO_2 — TiO_2 — La_2O_3 — MgF_2 auf das Substrat abgeschieden. Diese schichtbildenden Substanzen liefern bei entsprechender Wahl der Schichtherstellungsparameter die zur Realisierung der optischen Eigenschaften des erfindungsgemäßen Breitband-Entspiegelungsschichtbelages erforderlichen Brechzahlen bzw. Brechzahl dispersionen.

Als zweites Beispiel soll das dielektrische Schichtsystem für einen erfindungsgemäßen Breitband-Entspiegelungsschichtbelag angegeben werden, der im Spektralbereich von 450 nm bis 1100 nm eine Restreflexion $R \leq 0,85\%$ aufweist und eine hohe Laserfestigkeit besitzt. Dazu wird eines der oben bereits genannten Substrate mit fünf Einzelschichten belegt, deren optische Schichtdicken jeweils 160 nm betragen. Dabei müssen für die Einzelschichten die in Tabelle 2 angegebenen Werte für die

Brechzahlen realisiert sein, die in dem zweiten Ausführungsbeispiel beginnend mit der ersten, unmittelbar am Substrat anliegenden Schicht durch die Reihung folgender schichtbildender Substanzen approximiert werden: Al_2O_3 - Y_2O_3 - ZrO_2 - Gd_2O_3 - MgF_2 . Diese Substanzen liefern bei entsprechender Wahl der Schichtherstellungsparameter die zur Realisierung der optischen Eigenschaften des erfindungsgemäßen Breitband-Entspiegelungsschichtbelages erforderlichen Brechzahlen bzw. Brechzahldispersionen.

Die Herstellung der in beiden Beispielen angegebenen Breitband-Entspiegelungsschichtbeläge kann mit Hilfe konventioneller Hochvakuumbeschichtungstechnik beispielsweise durch Elektronenstrahlverdampfen der Ausgangsmaterialien in bekannter Weise erfolgen. Die in den Beispielen zur Realisierung der erforderlichen Brechzahlen angegebenen schichtbildenden Substanzen sind kompatibel und besitzen gute schichtoptische Gebrauchswerteigenschaften, die spezifische Applikationsforderungen erfüllen. Es ist durch geringfügige Modifizierung der in Tabelle 1 und Tabelle 2 angegebenen Parameter des erfindungsgemäßen Breitband-Entspiegelungsschichtbelages oder durch eine entsprechende Wahl des Beschichtungsverfahrens vorteilhaft möglich, anstelle des niedrigbrechenden Fluorides MgF_2 das niedrigbrechende Oxid SiO_2 als äußere Schicht einzusetzen.

Tabelle 1

Schicht-Nr.	Optische Dicke $n \times d$ (Nanometer)	Brechzahl n
Substrat BK-7		1,52
1	160	1,68
2	160	2,05
3	160	2,30
4	160	1,94
5	160	1,38
Superstrat	Luft	1,0003

Tabelle 2

Schicht-Nr.	Optische Dicke $n \times d$ (Nanometer)	Brechzahl n
Substrat BK-7		1,52
1	160	1,60
2	160	1,83
3	160	2,00
4	160	1,80
5	160	1,38
Superstrat	Luft	1,0003

